ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ СУПЕРПОЗИЦИИ ВИХРЕВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Герасимова Л.О., Кусков В.В., Махманазаров Р.М., Фалиц А.В.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

Томск, 634021, пл. Академика Зуева, 1

lilyan@iao.ru, vvk@iao.ru, rmakhman@iao.ru, falits@iao.ru

Ключевые слова: турбулентная атмосфера, вихревой пучок, топологический заряд, распространение излучения, интенсивность, коэффициент пространственной корреляции.

Проведены эксперименты по исследованию статистических характеристик поля суперпозиции вихревых оптических пучков в турбулентной атмосфере. Рассчитаны среднее значение и коэффициент пространственной корреляции флуктуации интенсивности суперпозиции вихревого излучения в зависимости от интенсивности оптической турбулентности на трассе распространения для различных начальных пространственных распределений поля. Показано, чем выше величина топологического заряда в суперпозиции вихревого пучка, тем ниже флуктуации его интенсивности.

Интерес к созданию сложных распределений начального поля, в частности, суперпозиции вихревых лазерных пучков, обусловлен перспективами практического использования таких пучков для оптического кодирования и передачи информации в различных средах [1–3]. В настоящей работе по результатам эксперимента по распространению осевой суперпозиции вихревых оптических полей с различными топологическими зарядами на атмосферной трассе, проведен анализ флуктуаций интенсивности излучения, распространяющегося в турбулентной атмосфере, в зависимости от силы оптической турбулентности на трассе распространения.

Схема эксперимента

Эксперименты по исследованию распространения вихревых лазерных пучков в турбулентной атмосфере проводились на Базовом Экспериментальном комплексе Института оптики атмосферы СО РАН. На рисунке 1 представлена экспериментальная схема по генерации и демодуляции суперпозиции вихревых оптических пучков. Лазерный луч с длиной волны 532 нм и мощностью до 0,5 Вт расширялся линзовым телескопом Л1–Л2 (f_1 = 25,4 мм, f_2 = 100 мм), и освещал пространственный модулятор света производства фирмы «Holoeye».

С помощью модулятор формировались суперпозиции вихревых лазерных полей. Путём загрузки сгенерированной компьютерной фазовой маски на жидкокристаллический модулятор

света Pluto-2.1-Vis-016. Во время экспериментов использовались пучки, комплексное поле которых

$$U_{l=l_1+l_2}(x,y) = U_1 + U_2 = A_{l_1}(x,y)e^{iq_{l_1}(x_{l_1},y_{l_1})} + A_{l_2}(x,y)e^{iq_{l_2}(x_{l_2},y_{l_2})} \quad (1)$$

где $A(x,y)$ – амплитуда поля, $q(x,y) = \pm l\, arctg2(y/x)$ – фаза вихревого поля, l – величина топологического заряда вихревого пучка, функция $arctg2(y/x)$ определяет главное значение фазы в интервале [0, 2π); представляло собой суперпозицию пучков с топологическими зарядами $l = l_1 + l_2$ = 1+1 и 1 + 5.

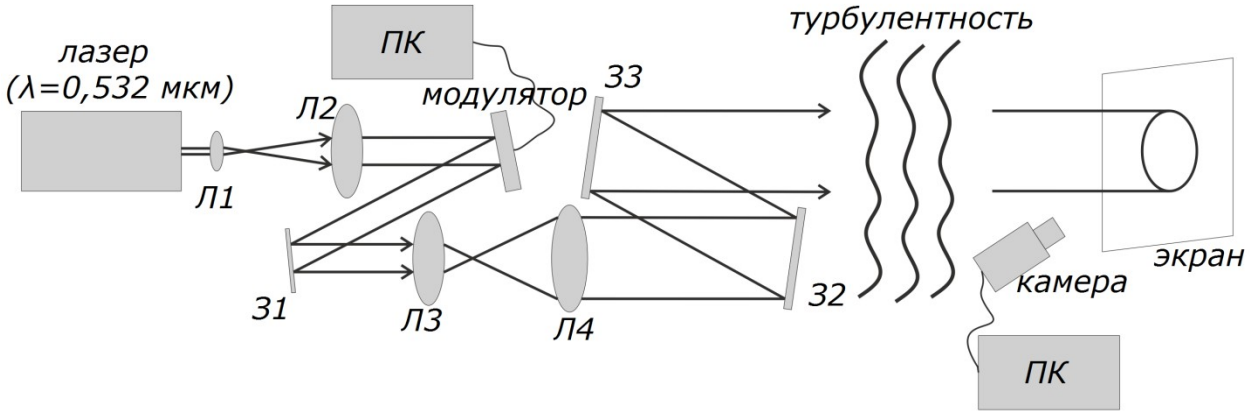

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

Далее, промодулированное излучение через систему зеркал (З1–З3) и расширяющий линзовый телескоп Л3–Л4 (f_3=85 мм, f_4= 700 мм) направлялось в атмосферу. В конце атмосферной трассы распространения на расстоянии L = 500 м располагался белый матовый экран, на котором при помощи скоростной видеокамеры MV-CA013-21UC фирмы «Hikribot» с частотой до 20 Гц и временем экспозиции 200 мкс регистрировались двумерные распределения интенсивности. Длительность одного сеанса регистрации составляла 45 секунд. Таким образом, с учётом частоты съема кадров, в каждом сеансе было до 900 независимых распределений интенсивности.

Контроль величины оптической турбулентности осуществлялся с использованием акустической метеостанции АМК-03 (Сибаналитприбор, г. Томск) с частотой 80 Гц, расположенной на расстоянии L = 150 м от начала трассы распространения. По данным

метеостанции оценивалась величина структурной постоянной показателя преломления воздуха C_n^2.

На рисунке 2 приведен пример фазовой маски (рис. 2*а*), создаваемой на пространственном модуляторе, и двумерное распределение интенсивности в начальной плоскости $L = 0$ (рис. 2*б*).

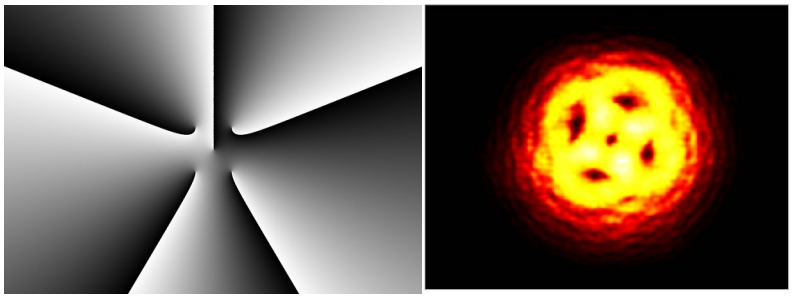

Рисунок 2 – Фазовая маска, создаваемые с использованием пространственного модулятора света (*а*), начальное двумерное распределение интенсивности в поперечном сечении пучков (*б*) суперпозиции вихревых пучков с $l = 1 + 5$.

Из рис. 2 видно, что вследствие интерференции двух вихревых оптических пучков с различными топологическими зарядами l пространственное распределение интенсивности отличается от кольцевой структуры вихревого пучка и имеет сложное распределение, состоящее из одной и четырех точек дислокации на внутреннем и внешнем кольцах соответственно [4].

На рисунке 3 приведены результаты расчёта коэффициента пространственной корреляции

$$R(y) = \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_{1i} - \langle y_1 \rangle)(y_{2i} - \langle y_2 \rangle)}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\langle y_{1i} \rangle - \langle y_1 \rangle)^2}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\langle y_{2i} \rangle - \langle y_2 \rangle)^2}} \quad (1)$$

в точке максимума распределения интенсивности начального поля при слабых $\beta_0^2 = 0{,}19$ и сильных $\beta_0^2 = 1{,}84$ флуктуаций интенсивности; суперпозиции вихревых $l = 1 + 1;\ 1 + 5$ пучков в зависимости от координаты y.

Безразмерный параметр [5]

$$\beta_0^2 = 1{,}23\ C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}, \quad (2)$$

где $k=\frac{2\pi}{\lambda}$, характеризует интенсивность турбулентных искажений на трассе распространения. Величина C_n^2 вычислялась по данным с метеостанции из структурной функции флуктуаций температуры C_T^2 с осреднением за 5 минут.

Из сравнения кривых, изображенных на рисунке 3, следует, для всех рассмотренных случаев распространения суперпозиции вихревых пучков четко выражен корреляционный максимум, по спаданию которого да уровня по уровню $R(y)=e^{-1}$ можно определить радиус корреляции. Чем выше порядок l в суперпозиции вихревого пучка, тем меньше радиус пространственной корреляции.

В отличие от суперпозиции l = 1+1, с ростом l в суперпозиции вихревого пучка кривая $R(y)$ имеет два максимума. С увеличением параметра β_0^2 вид кривой $R(y)$ сохраняется. Таким образом, спектр флуктуаций интенсивности суперпозиции l = 1+1 будет шире в сравнении с вихревым пучком, состоящим из суммы двух пучков с l = 1+5.

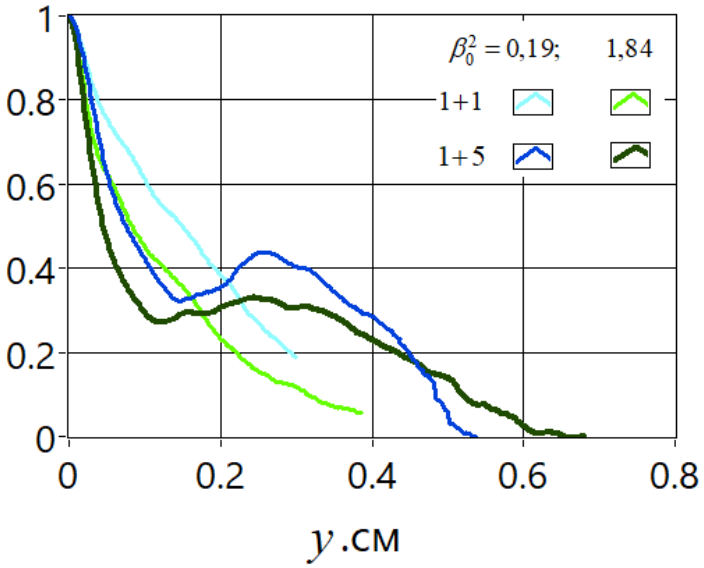

Рисунок 3. Коэффициент пространственной корреляции слабых и сильных флуктуаций интенсивности суперпозиции вихревых l = 1 и 1, 1 и 5 пучков при β_0^2 =0,19; 1,84.

Заключение

По экспериментальным данным выполнен анализ влияния турбулентности на распространение суперпозиции вихревого лазерного излучения на атмосферной трассе длиной

500 м. Эксперименты проводились с пучками, представляющими собой суперпозицию вихревых пучков с топологическими зарядами 1 и 1 и 1 и 5. Представлены результаты анализа корреляционной функции флуктуаций интенсивности при различных условиях распространения на атмосферной трассе. Показано, что с уменьшением величины топологического заряда в суперпозиции вихревого пучка спектр флуктуаций интенсивности такого пучка увеличивается.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН).

Литература

1. Naidoo D., Aït-Ameur K., Brunel M. and Forbes A. Intra-cavity generation of superpositions of Laguerre–Gaussian beams // Appl Phys B. 2012. V. 106. P. 683–690.
2. Huang S., Miao Zh., He Ch., Pang F., Li Y. and Wang T. Composite vortex beams by coaxial superposition of Laguerre–Gaussian beams // Optics and Lasers in Engineering 2016. V. 78. P. 132–139.
3. Tudor R., Mihailescu M., Paun I.A., Nan A.E., Kusko M. and Kusko C. Propagation robustness of two Laguerre-Gauss beam superposition // Proc. of the Rom. acad. S. A. 2016. V. 17. No. 3. P. 222–229.
4. Герасимова Л.О., Фалиц А.В. Распространение суперпозиции мод импульсного лагерр-гауссова лазерного пучка в турбулентной атмосфере // Актуальные проблемы радиофизики. Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. 2017. С. 119–122.
5. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 270 с.